

Из рис. 3 видно, что вариант 1 мало отличается от исходного. В вариантах 2 и 3 за счет оптимизации диаметров отверстий температурное поле выравнивается и локальный перегрев уменьшается.

В дальнейшем планируется оптимизация конструктивных размеров камеры путем численных исследований и инженерных расчетов для определения требуемых расходов воздуха и газа.

Библиографический список

1. Сулимов Д.Д. Газотурбинные установки ОАО «Авиадвигатель» для работы на синтез-газе, полученном в результате газификации угля [Электронный ресурс]. URL: http://avid.ru/upload/pages/5914/sbornik_154-158.pdf (дата обращения: 29.11.13).
2. Никулина А.Ю. Камера сжигания бедных газов в высокотемпературном воздушном потоке: дисс. магистра техники и технологии 140100.68; УрФУ. Екатеринбург, 2012. 81 с.
3. Абатурова О. С. Моделирование камеры догрева циклового воздуха для гибридной ПГУ на твердом топливе мощностью 300 МВт: дисс. магистра техники и технологии: 140100.68; УрФУ. Екатеринбург, 2013. 76 с.

ТЕНДЕНЦИИ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ В СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

*Халевицкий Ю.В.
УрФУ, me@dijkstra.ru*

Суперкомпьютерные системы используются во многих областях науки и промышленности. Они широко применяются для моделирования различных физических и экономических процессов, прогнозирования погоды, а также в инженерных задачах.

В настоящее время большинство суперкомпьютеров имеют кластерную архитектуру. Кластер состоит из большого количества серверов, называемых также *узлами*. Сервера соединены высокопроизводительной локальной вычислительной сетью, предназначенной для организации взаимодействия в процессе вычислений [1]. В качестве узлов кластера могут выступать как традиционные сервера, подобные тем, что используются для поддержки веб-порталов, так и специальные системы, оснащённые вычислительными ускорителями и предназначенные для проведения интенсивных вычислений. Кластеры, содержащие процессоры одного типа, называют *гомогенными*. Кластеры, оснащённые различными процессорами, в том числе вычислительными ускорителями, принято называть *гетерогенными*.

Рассеиваемая мощность современного суперкомпьютера может достигать тысяч киловатт. Так, например, мощность суперкомпьютера Тяньхэ-2 составляет 17,8 МВт [2]. Затраты на электроэнергию, связанные с проведением вычислений, могут достигать значительных величин: при цене электроэнергии в 0,1002 долл. США за кВт·ч [3] содержание такой системы обошлось бы китайскому правительству в 15 млн долл. США в год, что в долгосрочном периоде сравнимо с ценой самой вычислительной системы, которая оценивается в 200-300 млн долл. США [4].

Высокая стоимость необходимой для вычислений электроэнергии – самая очевидная, однако, не единственная причина высокой актуальности повышения энергоэффективности в суперкомпьютерных технологиях. Построение кластер-

ной системы требует организации подачи электроэнергии и отведения тепла, выделяемого вычислительной техникой и коммуникационным оборудованием. Это накладывает ограничение на максимально возможное энергопотребление вычислительного центра и не позволяет неограниченно наращивать производительность простым увеличением количества вычислителей.

В большинстве систем для отвода тепла используется воздушная система охлаждения, однако, существуют решения, основанные на жидкостном отводе тепла от стоек. При этом количество отводимого тепла настолько велико, что жидкость может использоваться для обогрева помещений [5].

Производительность вычислительных систем принято измерять в количестве элементарных математических операций, производимых над числом с плавающей точкой, которые такая система может выполнить за одну секунду (FLOPS, FLoating point OPerations per Second). Для оценки энергоэффективности может использоваться производная величина, которая характеризует количество FLOPS, производимых системой в пересчёте на один ватт мощности, FLOPS/Вт.

Данные о производительности и энергоэффективности систем, задействованных в научных вычислениях, являются открытыми. На основе этих данных научное сообщество публикует списки наиболее производительных систем. Наиболее известный список, оценивающий производительность вычислительных систем на основе времени решения системы линейных алгебраических уравнений с плотной матрицей, был впервые опубликован в 1993 г. и получил название TOP500 [2].

Начиная с 2007 г., производится также составление списка наиболее энергоэффективных систем, получившего название Green500 [6].

В таблице приводится информация о суперкомпьютерах, занявших первое место в списке Green500 за всё время его существования.

Характеристики наиболее энергоэффективных суперкомпьютеров по версии Green500

Версия списка	Процессор, лежащий в основе лидера	Разрешение литографического оборудования	Энергоэффективность, MFLOPS/Вт
Осень 2007	Blue Gene/P	90 нм	357,23
Зима 2008	Blue Gene/P	90 нм	357,23
Лето 2008	PowerXCell 8i	65 нм	488,09
Лето 2009	PowerXCell 8i	65 нм	536,24
Осень 2009	PowerXCell 8i	65 нм	722,98
Лето 2010	PowerXCell 8i	65 нм	773,38
Осень 2010	Blue Gene/Q	45 нм	1684,20
Лето 2011	Blue Gene/Q	45 нм	2097,19
Осень 2011	Blue Gene/Q	45 нм	2026,48
Лето 2012	Blue Gene/Q	45 нм	2100,88
Осень 2012	Intel Xeon E5-2670 + Intel Xeon Phi 5110P	32 нм + 22 нм	2499,44
Лето 2013	Intel Xeon E5-2687W + NVIDIA K20	22 нм + 28 нм	3208,83
Осень 2013	Intel Xeon E5-2620v2 + NVIDIA K20x	22 нм + 28 нм	4503,17

До осени 2012 г. лидирующие позиции в списке занимали гомогенные кластеры, построенные на базе энергоэффективных процессоров архитектур PowerPC и Cell BE. Суперкомпьютеры, основанные на широко применяемых процессорах архитектуры x86, существенно отставали в энергоэффективности. Это объясняется как характеристиками самих процессоров, так и эффективной компоновкой вычислительных узлов, которая позволяет эргономично отводить тепло с поверхности микросхем.

Начиная с осени 2012 г., первое место в списке начали занимать гетерогенные кластеры, оснащённые вычислительными ускорителями, подключенные к основным процессорам по шине PCI-Express. Вычислительный сопроцессор Intel Xeon Phi технически имеет архитектуру x86, однако обладает широкими векторными регистрами, меньшим размером кэша, и большим количеством ядер. Ускорители Nvidia Tesla K20 построены на основе графических карт и оснащены потоковыми мультипроцессорами архитектуры GK110.

Рассеиваемая мощность процессоров естественным образом уменьшается с совершенствованием элементной базы: это объясняется снижением напряжения питания процессора. Следует отметить, что повышение энергоэффективности идёт быстрее, чем уменьшается разрешение техпроцесса; это вызвано качественными изменениями в архитектуре вычислительных систем. Несмотря на прекратившийся рост тактовой частоты работы процессоров, каждый из них обладает всё большим количеством ядер. Так процессоры Blue Gene/P оснащены четырьмя вычислительными ядрами, PowerXCell 8i — девятью, Blue Gene/Q — восемнадцатью ядрами. Ещё более высокий уровень параллелизма поддерживается ускорителями. Так, Intel Xeon Phi содержит 60 ядер. Nvidia Tesla K20 суммарно содержит 2688 потоковых процессоров.

Видно, что повышение плотности вычислительных элементов за счёт их упрощения, а также уменьшения объёма и упрощения кэшей позволяет добиться большей энергоэффективности.

Библиографический список

1. Воеводин Вл.В., Жуматий С.А. Вычислительное дело и кластерные системы. М.: Изд-во МГУ, 2007. 150 с.
2. Список Top500. URL: <http://www.Top500.org>
3. Цены на электроэнергию в России и мире: сравнительный анализ / Институт проблем естественных монополий. URL: http://ipem.ru/images/stories/Files/energy/tnk_bp_tceny.pdf
4. Enter the Dragon: The Chinese superputer set to win the Top500 crown. Full specs on the 17-megawatt 'Sky River' // The Register. Timothy Prickett Morgan. 10 June 2013.
5. Rich Miller. IBM's Hot-Water Supercomputer Goes Live // Data Center Knowledge, 5 July 2010.
6. Список Green500. URL: <http://www.green500.org/>